

基于层次分析法对扬州市深层地下水资源评价

王红梅¹, 黄勇¹, 王丽丽²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098; 2. 江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏扬州 225002)

摘要:针对我国目前缺少有效评价城市地下水资源脆弱性的问题, 本文以扬州市规划区(广陵区、邗江区)为例进行地下水资源脆弱性评价探讨, 结合其地下水资源的特性、水文和地质资料, 选取了13个指标构建地下水资源脆弱性评价指标体系, 运用层次分析法确定指标权重并进行一致性分析。结果表明, 扬州城市规划区深层地下水脆弱性等级为Ⅱ-Ⅲ级, 地下水资源相对丰富。

关键词:地下水资源; 脆弱性; 指标体系; 层次分析法; 扬州市

中图分类号: P641

文献标识码: A

Evaluation of deep groundwater resources Yangzhou based on AHP

WANG Hongmei¹, HUANG Yong¹, WANG Lili²

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Yangzhou 225002, China)

Abstract: Vulnerability of groundwater resources is the basis for regional water resources planning and management. In view of the current lack of effective evaluation of groundwater resources, the groundwater resources was evaluated by taking the Yangzhou City Planning Area (Guangling, Hanjiang District) as example. Based on the characteristics of groundwater resources, hydrological and geological data, thirteen indexes were selected as the assessment index system, And the AHP was used to determine the index weight and finish the consistency analysis. The results showed that the groundwater vulnerability grade of Yangzhou urban planning area is Ⅱ - Ⅲ, the groundwater resources are relatively rich.

Key words: groundwater resources; vulnerability; index system; Analytic Hierarchy Process; Yangzhou

水资源脆弱性研究源于20世纪60年代法国Albinet和Marget提出的地下水资源脆弱性概念, 是度量水资源安全的重要标准, 也是作为制约水资源安全的基础性问题^[1]。邹君等^[2]针对衡阳盆地利用综合指数法进行了地表水资源的脆弱性及其评价分析; 匡洋等^[3]以河海流域为研究对象, 利用主成分分析法进行了河海流域水资源脆弱性理论及评价; 孔庆轩等^[4]利用DRASTIC模型, 对黑河市浅层地下水进行了地下水脆弱性评价。总体来说, 国内地下水资源脆弱性研究还处于初步阶段, 近年来人们对地下水脆弱性研究主要集中在

地下水污染方面, 而针对城市地下水资源量的脆弱性方面极少, 因而本文结合扬州规划区的特点对其地下水资源脆弱性进行分析评价。

1 研究区概况

随着近年来地方经济建设的飞速发展, 扬州市替代水源工程的全面实施, 地下水资源管理工作的日益加强, 规划区地下水资源的开采利用发生了较大变化, 其水位动态亦产生了明显的起伏回落。扬州市漏斗中心在扬州毛纺厂(现通裕一纺)附近, 呈轴向北东向延伸, 漏斗面积近

10 km²^[5]。因此,在扬州规划区开展深层地下水资源脆弱性评价,对预测将来地下水资源安全变动走向,探求地下水资源安全的过程和关键性要素具有十分重要的意义。

1.1 研究区位置

研究范围为扬州市所辖的广陵区、邗江区(以下简称扬州城市规划区),总面积约1 021 km²,属于长江中下游平原和江淮平原,地势平缓,地处亚热带湿润气候区,季风显著,四季分明,年平均气温14.8℃。扬州城市规划区南濒长江,东依江都区,西邻仪征市,北接高邮市,地跨北纬32°13′~32°40′,东经119°16′~119°34′,区内淮河流域面积866 km²、长江流域面积155 km²。根据扬州雨量站降水量资料,多年平均降水量1 031.6 mm,最大年降水量1 576.7 mm(1954年),常年蒸发量为700~1 000 mm。研究区内承压含水层埋藏深度较大,不易接受大气降水补给,在天然状态下来自古淮河、古长江河道上游地区地下水径流补给,消耗于人工开采和地下径流排泄。

1.2 水文地质条件

研究区内按含水介质性质分松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类,以松散岩类孔隙水分布最广泛,水量最丰富,为扬州市区主要供水开采层,而基岩水被不同程度掩埋,仅在局部地区有少量开采。因此本次区内评价对象为松散岩类孔隙水,不涉及基岩裂隙水。按含水层的埋藏条件和成因时代可分为潜水和第Ⅰ承压、第Ⅱ承压、第Ⅲ承压和第Ⅳ承压水五个含水层组。由于主要开采第Ⅰ、第Ⅱ和第Ⅲ承压含水层,因此本文研究的深层地下水主要是以上3个承压含水层。

第Ⅰ承压含水层组:该含水层组分布在蒋王镇—扬州一线沿岸抵长江地区,由第四系上更新统(Q₃)古长江冲击砂层构成,在北部地区存在含水层缺失情况。含水层顶板埋深24.4~56.0 m,向东南倾斜,砂层厚度14.0~74.0 m,水位埋深2~3 m。富水性受古长江河道控制,新坝—红桥一带为古长江主泓线区,含水岩性为含砾粗砂、含砾中粗砂,砂层厚度达56 m,单井涌水量由3 000~4 000 m³/d,从新坝至扬州方巷含水层厚度逐渐变薄,含水介质颗粒逐渐变细,单井涌水量由3 000~4 000 m³/d逐渐向小于500 m³/d过渡,扬州市区西北部为漫滩边缘区,含水岩性为粉细砂组合,

单井涌水量小于500 m³/d。沿江一带与潜水含水层之间水力联系密切。

第Ⅱ承压含水层组:该含水层组分布于甘泉(祝庄)—扬州市区(城南)—霍桥—红桥(北)一线以北地区,主要由第四系中更新统(Q₂)古淮河支叉河到冲击砂层构成,南部地区含水层含水层缺失严重。含水层顶板埋深70.0~90.0 m,砂层厚度8.0~56.0 m,富水性受古河道控制;赤岸—黄珏—弯头一线为古河道,含水岩性为中粗砂,砂层厚度35.0~56.0 m,单井涌水量2 000~3 000 m³/d;古河道以南由漫滩向边缘过渡,岩性由中细砂向细砂渐变,含水层逐渐变薄,单井涌水量由1 000~2 000 m³/d向小于500 m³/d过渡。

第Ⅲ承压含水层组:该含水层组分布于甘泉—酒甸一线以北,由第四系下更新统(Q₁)淮古河道冲击砂层构成,南部地区含水层缺失严重。含水层顶板埋深110.0~140.0 m,砂层厚度10.0~35.0 m,为单层含水层结构。富水性受岩性和砂层厚度控制,滨湖—黄珏一带为古河道摆动区,含水岩性为中粗砂,砂层厚度25.0~35.0 m,单井涌水量2 000~3 000 m³/d。漫滩区含水岩性为中细砂、边缘地区为细粉砂,单井涌水量由1 000~2 000 m³/d向小于单井涌水量500 m³/d变化。该层组在区内北部的乡镇已开发利用,水位埋深15.0~20.0 m。

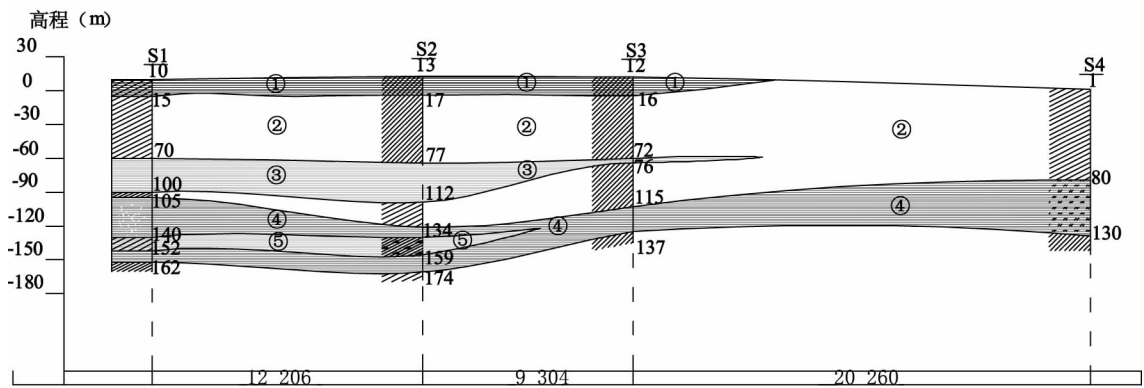
目前,第Ⅱ和第Ⅲ承压含水层为扬州市区地下水的主采层,分布在城区东北部,大致分布在岗区以南,瘦西湖以东,北河下以北。顶板埋深一般在70~90 m。自西到东,自南到北,含水砂层逐渐变厚,东边电厂一带最厚,含水层厚度达60 m左右。这两个含水层之间的隔水层较薄,有些地方不足1 m,实际成井过程中,某些地区这两层相互连通,同时开采两个层位地下水,具体见图1扬州市水文地质剖面图。

2 地下水开采现状

根据2004~2014年《扬州市水资源公报》中地下水开采资料,分开采量、开采用途和主采层统计分析近十年地下水开采情况。至2014年底,区内有承压含水层取水井104眼,地下水开采量403×10⁴ m³,均用于工业。

2.1 地下水开采量

2004年至2006年,区内深层地下水开采量基



图例 (水平1:50 000 垂直1:1 000)

- | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-----|--------|----------|
| 1. 松散类孔隙水 (单井涌水量 m ³ /d) | 2. 岩浆岩类裂隙孔隙水 | 粘土 | 中细砂夹粘土 | ① 地层代号 |
| 水量极贫乏 <10 | 水量贫乏 <100 | 细砂 | 含砾粘土 | 地层界限 |
| 水量贫乏 10-100 | 水量中等 100-1 000 | 中粗砂 | | 勘探号/地面高程 |

图1 扬州市水文地质剖面图

Fig.1 Hydrogeologic profile of Yangzhou City

本在 $1\ 400 \times 10^4\ \text{m}^3$ 左右,分别用于工业和生活;2007 年区内区域供水工程全面实施通水,地下水不作生活用途,2007 年至 2014 年开采量稳步下降,由 $664 \times 10^4\ \text{m}^3$ 降至 $403 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。根据 2014 年地下水开采利用调查结果显示,区内 2014 年地下水总开采量 $403.4 \times 10^4\ \text{m}^3$,日均开采量 $1.1 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。各区由于水文地质条件及社会经济发展状况等不同,地下水开发利用强度也存在较大差异。总体而言,区内开采井在广陵区分布密度最大,达 0.2 眼/ km^2 ,开采强度明显高于邗江区;全区平均开采井密度约 0.1 眼/ km^2 ,开采模数为 $0.41 \times 10^4\ \text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。

2.2 地下水用途

2004 年至 2006 年区内深层地下水用于工业和生活。乡镇水厂取用地下水作为生活用途,而随着区域供水工程的实施,乡镇地下水厂取水量逐年减少,2007 年区域供水工程全面通水,区内水厂水源由地下水全部改为地表水,地下水不作为生活用途,目前地下水仅用于特殊行业的工业用水。

3 地下水资源脆弱性评价

地下水资源系统错综复杂,相互间产生作用,选出的主要指标的评价因子应具备科学性、完整性、主导性、独立性和动态性。按地下水资源脆弱性形成因素,确立的脆弱性指标分为自然、人为、承载三大类。

3.1 指标的选取

以下指标都是针对承压含水层而言,自然脆弱性方面选取干旱指数(x_1)、年平均降雨量(x_2)、隔水顶板厚度(x_3)、含水层厚度(x_4)、贮水系数(x_5)和渗透系数(x_6)6 个指标。 x_1 说明了气候干旱程度,其值是年蒸发能力和年降水量的比值; x_2 与地表水的补给有直接关系,都侧面反映出是否会大量开采地下水的可能; x_3 、 x_4 和 x_5 反映了扬州市区地下水资源的丰富程度,主要体现含水层储水蓄水能力; x_6 代表土的渗透性强弱的定量指标。本文通过对 3 个含水层井进行抽水试验或注水试验取得渗透系数,范围是 $9.10 \times 10^{-4} \sim 3.25 \times 10^{-1}\ \text{cm/s}$,基于渗透系数所得到的注水系数为 $1.22 \times 10^{-3} \sim 6.42 \times 10^{-2}$ 。

人为脆弱性方面选取人均地下水资源量(x_7)、地下水开发利用率(x_8)、地下水占用水比例(x_9)和植被覆盖率(x_{10})4 个指标。 x_7 是通过 Fe-flow 软件进行数值模拟计算取得,3 个承压含水层可开采地下水资源量共 $1\ 288.61 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{a}$,城市规划区人口以 2003 年计约为 118.59 万,则人均地下水资源量为 $10.86\ \text{m}^3/\text{a}$ 。 x_8 和 x_9 反映了人类活动影响下地下水资源的配置和开发利用程度^[6]。 x_{10} 在一定程度上与防止水土流失有关,地表枯枝落叶层对水土有保持作用,地下根系可提高土壤抗冲性。

承载脆弱性方面选取人口密度(x_{11})、人口增长速度(x_{12})和工业万元产值用水量(x_{13})3 个指

表1 地下水资源脆弱性评价指标

Tab. 1 Indexes of groundwater resources vulnerability assessment of Yangzhou

评价指标	I	II	III	IV	V
干旱指数(无量纲)	<1	$1 \leq x_1 < 1.1$	$1.1 \leq x_1 < 1.2$	$1.2 \leq x_1 < 1.3$	≥ 1.3
年平均降雨量(mm)	≥ 1200	$900 \leq x_2 < 1200$	$600 \leq x_2 < 900$	$300 \leq x_2 < 600$	<300
隔水顶板平均厚度(m)	<9	$9 \leq x_3 < 16$	$16 \leq x_3 < 13$	$23 \leq x_3 < 30$	≥ 30
含水层平均厚度(m)	≥ 35	$25 \leq x_4 < 35$	$15 \leq x_4 < 25$	$5 \leq x_4 < 15$	<5
贮水系数(无量纲)	$\geq 1.0E^{-1}$	$5.0E^{-2} \leq x_5 < 1.0E^{-1}$	$1.0E^{-3} \leq x_5 < 5.0E^{-2}$	$5.0E^{-4} \leq x_5 < 1.0E^{-3}$	< $5.0E^{-4}$
渗透系数($cm^{-3} \cdot s$)	$\geq 2.0E^{-1}$	$2.0E^{-2} \leq x_6 < 2.0E^{-1}$	$2.0E^{-4} \leq x_6 < 2.0E^{-2}$	$2.0E^{-5} \leq x_6 < 2.0E^{-4}$	< $2.0E^{-6}$
人均地下水资源量($m^3 \cdot a^{-1}$)	≥ 100	$70 \leq x_7 < 100$	$40 \leq x_7 < 70$	$10 \leq x_7 < 40$	<10
地下水开发利用率(%)	<5	$5 \leq x_8 < 15$	$15 \leq x_8 < 25$	$25 \leq x_8 < 35$	>35
地下水占用水比例(%)	<10	$10 \leq x_9 < 25$	$25 \leq x_9 < 40$	$40 \leq x_9 < 55$	>55
植被覆盖率(%)	≥ 60	$45 \leq x_{10} < 60$	$25 \leq x_{10} < 40$	$10 \leq x_{10} < 25$	<10
人口密度(人· km^{-2})	<800	$800 \leq x_{11} < 1200$	$1200 \leq x_{11} < 1600$	$1600 \leq x_{11} < 2000$	>2000
人口自然增长率(‰)	<1	$1 \leq x_{12} < 3$	$3 \leq x_{12} < 5$	$5 \leq x_{12} < 7$	≥ 7
工业万元产值用水量($m^3 \cdot 万^{-1}$)	<10	$10 \leq x_{13} < 30$	$30 \leq x_{13} < 90$	$90 \leq x_{13} < 120$	≥ 120

标。这三个指标主要从人类社会对水的需求的角度反映人类社会活动给水资源系统带来的压力。

3.2 评价指标分级标准

对评价指标采用常用的5级100分制划分等级,根据评价区域各评价单元指标的现状值进行评分(表1)。指标采用等间距分级方法确定分级临界值,即先确定各指标数值的极差,将其除以5得到分级的级差,然后确定分级临界值,具体详见曹茂林的层次分析法确定评价指标权重及 Excel

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1/2 & 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/5 & 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1/5 & 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1/2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 & 1/3 \\ 3 & 3 & 4 & 5 & 5 & 4 & 1 & 1/3 & 1/2 & 2 & 3 & 3 & 1 \\ 4 & 4 & 5 & 6 & 6 & 5 & 3 & 1 & 1/2 & 2 & 2 & 3 & 1 \\ 5 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 2 & 2 & 1 & 2 & 4 & 5 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1/2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2)权重 w 的方根法计算步骤先对判断矩阵每一行元素进行乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n x_{ij}, i = 1, 2, \dots, 13$; 再计算 M_i 的13次方根 $\overline{W}_i = \sqrt[13]{M_i}$ 。然后对向量 $w = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \dots, \overline{W}_n]^T$ 归一化, $w_i = \overline{W}_i / \sum_{i=1}^n \overline{W}_i, w_i$ 即为

计算^[7]。在江苏省或者全国范围内考虑各指标数值的极值分布,进而确定各指标的极差。

3.3 权重与一致性计算

(1)构建判断矩阵。判断矩阵是一个正交矩阵,左上至右下对角线位置上的元素为1,其两侧对称位置上的元素互为倒数,其中 $x_{ij} > 0, x_{ii} = 1, x_{ij} = 1/x_{ji}$ (其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$)。本次研究 $n = 13$, 根据九级标度法进行78次比较,其构造矩阵见下面公式(1)。

指标权重。最后求出判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^n \frac{(xW)_i}{w_i} = 14.0694$ 。

(3)一致性检验。当一致性指标 $CI < 0.1$ 时认为层次排序结果符合一致性要求;当 $CI > 0.1$ 时,需要重新调整各指标的权重取值,直到获取一

致性为止。式中 CI 可以用式(2)计算

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (14.0694 - 13) / (13 - 1) = 0.0891 \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根, n 为判断矩阵阶数,表 2 为重复计算 1 000 次得出的 RI 值^[7]。一致性检验是通过一致性指标 CI 与平均随机一致性指标 RI 之比求出随机一致性比率 CR ,即

$$CR = CI/RI = 0.0891/1.56 = 0.0571 < 0.1$$

因此地下水资源脆弱度(V)采用综合指数加权求和模型计算,即

$$V = \sum_{i=1}^n f_i \times w_i = \sum_{i=1}^n v_i \quad (3)$$

式中, f_i 为各评价指标原始数据经过分级打分所得的数值; w_i 为各因子相对地表水资源脆弱性的权重系数; n 为指标数,本文 $n = 13$; v_i 为各个指标在脆弱度中所占分值,根据地下水脆弱性评价指标体系 V 越大,脆弱度就越高;反之,脆弱度就越低,数值大小保持在 0 ~ 100 之间(表 2)。

4 结果分析与评价

采用加权几何平均综合排序向量法计算得到指标层各评价因子相对于地下水资源脆弱性的权重,各因子的权重计算结果见表 3。在众多评价指

标中,地下水开发利用率和地下水占用水比例最大,达到 34.10%,人为脆弱性占 56.33%,对规划区脆弱性影响最大。由式(3)可以计算地下水资源脆弱度(V)的值(表 4)。从表中可以看出,邗江区脆弱度为 40.34,属于等级 III,表明地下水资源容易贫乏。广陵区脆弱度为 34.50,属于等级 II,表明地下水资源丰富。

表 2 地下水脆弱性评价指标

Tabl.2 Groundwater Vulnerability assessment indexes

等级	脆弱性指数	脆弱程度	脆弱性
I	0 ~ 20	不脆弱	很丰富
II	20 ~ 40	弱	丰富
III	40 ~ 60	中等	容易贫乏
IV	60 ~ 80	较强	较容易贫乏
V	80 ~ 100	强	极度贫乏

5 结论

利用 AHP 法确定了深层地下水评价因子的相对权重,其中人为脆弱性权重为 0.5634,自然脆弱性权重为 0.2585,承载脆弱性权重为 0.1781,表明扬州市地下水资源利用方面的人为合理调控行为在降低水资源脆弱性方面的作用比较大;扬州市邗江区的脆弱性属于等级 III,表明地

表 3 评价因子权重

Tab.3 Evaluation of index weights

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	权重(w_i)
x_1	1	1/2	1/2	1	1	1	1/4	1/4	1/4	1/3	1	2	1/2	0.0382
x_2	2	1	1	2	2	2	1/3	1/4	1/3	1/3	2	2	1	0.0613
x_3	2	1	1	1	1	1	1/4	1/5	1/4	1/3	1	2	1	0.0465
x_4	1	1/2	1	1	1/2	1/2	1/5	1/6	1/4	1/2	1	2	1/2	0.0356
x_5	1	1/2	1	2	1	1	1/5	1/6	1/4	1/3	1/2	1	1/2	0.0364
x_6	1	1/2	1	2	1	1	1/4	1/5	1/4	1/3	1	2	1/3	0.0405
x_7	3	3	4	5	5	4	1	1/3	1/2	2	3	3	1	0.1302
x_8	4	4	5	6	6	5	3	1	1/2	2	2	3	1	0.1663
x_9	4	3	4	4	4	4	2	2	1	2	4	5	1	0.1747
x_{10}	3	3	3	2	3	3	1/2	1/2	1/2	1	1	2	1	0.0921
x_{11}	1	1/2	1	1	2	1	1/3	1/2	1/4	1	1	1	1/2	0.0473
x_{12}	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/3	1/3	1/4	1/2	1	1	1/3	0.0324
x_{13}	2	1	1	2	2	3	1	1	2	1	2	3	1	0.0985

$$\lambda_{\max} = 14.0694, CI = 0.0891, CR = 0.0571 < 0.1$$

表 4 地下水脆弱性分区

Tab.4 Groundwater vulnerability partition

区名	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	V
邗江区	1.11	2.14	2.33	2.67	1.42	1.62	6.77	9.14	4.02	2.95	1.42	0.81	3.94	40.34
广陵区	0.96	2.20	1.02	2.14	1.17	1.42	5.86	9.14	2.62	2.67	1.23	0.52	3.55	34.50

(下转第 75 页)

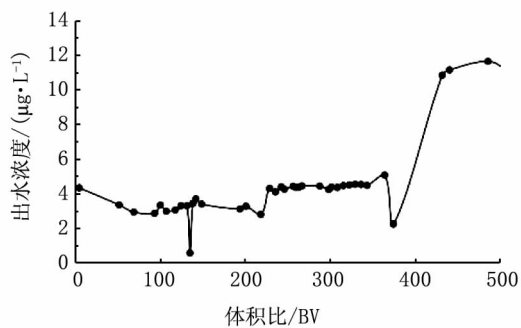


图6 N201-Fe(III)再生穿透曲线
Fig.6 Breakthrough curve N201-Fe(III) regeneration

3 结论

1) N201-Fe(III) 复合材料对 Sb(III) 的最大静态吸附容量为 610 $\mu\text{g/g}$ 。最佳 pH 值为 7。在有 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等竞争离子共存条件下, 仍然对 Sb(III) 具有高效的选择性吸附能力。

2) N201-Fe(III) 深度吸附浓度为 500 $\mu\text{g/L}$ 的废水, 对 Sb(III) 的稳定处理出水量为 190 BV, 吸附容量为 94.05 mg/L 。采用 2% EDTA 对 N201-Fe(III) 树脂进行再生, 再生度达到 85%, 满足工业应用要求。

参考文献:

- [1] 朱静, 郭建阳, 王力英, 等. 锑的环境地球化学研究进展概述[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 109.
- [2] 魏艳红. 《有色金属工业污染物排放国家标准—锑》的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [3] 吴彦军, 张林楠, 李振山, 等. 重金属废水无害化处理技术最新进展[J]. 工业水处理, 2009, 29(3): 1-3.
- [4] 宁增平, 肖唐付. 锑的表生地球化学行为与环境危害效

(上接第 71 页) 地下水资源容易贫乏; 广陵区的脆弱性属于等级 II, 表明水资源丰富。

参考文献:

- [1] DOERFLIGER N, JEANNIN P Y, ZWAHLEN F. Water vulnerability assessment in Karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools[J]. Environmental Geology, 1999, 39(2): 165-176.
- [2] 邹君, 刘兰芳, 田亚平, 等. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 92-98.
- [3] 匡洋, 夏军, 张利平, 等. 海河流域水资源脆弱性理论

应[J]. 地球与环境, 2007(2): 176-182.

- [5] 张帆, 李菁, 谭建华, 等. 吸附法处理重金属废水的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2749-2755.
- [6] 李福勤, 王鹏, 杨晓松, 等. 有色金属矿山重金属废水深度处理技术研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(9): 20-22.
- [7] 潘炳才, 张庆建, 陈新庆, 等. 基于 Donnan 膜效应的树脂基水合氧化铁的制备及对砷的吸附性能研究[J]. 中国科学, 2007, 37(5): 426-431.
- [8] 李福勤, 王少雄, 杨晓松, 等. D201 负载 Fe(III) 深度处理含 As(III) 废水[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(4): 35-37.
- [9] 刘建国, 蔡翠青, 彭涌涛. 锑矿石分析[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [10] 赵天从. 锑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [11] 徐祖信. 河流污染治理技术与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [12] BELZILE N, CHEN Y, WANG Z. Oxidation of antimony (III) by amorphous iron and manganese oxyhydroxides[J]. Chem. Geol., 2001, 174(4): 379-387.
- [13] FILELLA M, BELZILE N, CHEN Y W. Antimony in the environment: a review focused on natural waters: I. Occurrence[J]. Earth Science Reviews, 2001, 57(1-2): 125-176.
- [14] WANG M, REVIL A. Electrochemical charge of silica surfaces at high ionic strength in narrow channels[J]. Colloid and Interface Science, 2010, 343(1): 381-381.
- [15] CUMBAL L, SENGUPTA A. K. Arsenic removal using polymer-supported hydrated iron(III) oxide nanoparticles: role of Donnan membrane effect[J]. Environ. Sci. Technol., 2005, 39(17): 6508-6515.

(责任编辑 王利君)

及评价[J]. 水资源研究, 2012(1): 320-325.

- [4] 黄友波, 郑冬燕, 夏军, 等. 黑河地区水资源脆弱性及其生态问题分析[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1): 32-37.
- [5] 张成元, 赵苇航. 扬州市区深层地下水资源及其开发利用[J]. 扬州师院学报, 1991, 11(4): 58-64.
- [6] 李章林, 贾仁甫, 邓勇, 等. 扬州市水资源开发利用现状及对策[J]. 江苏水利, 2015(5): 34-36.
- [7] 曹茂林. 层次分析法确定评价指标权重及 Excel 计算[J]. 江苏科技信息, 2012(2): 39-40.

(责任编辑 王利君)